

学校编码: 10384  
学 号: 17720121151055

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

**基于 RPNN-SA-PSO 混沌时间序列预测模型  
的程序化交易研究**

**Programming trading Research based on the RPNN-SA-PSO  
chaotic time series prediction model**

高 鑫

指导教师姓名: 孟力教授  
专 业 名 称: 管理科学与工程  
论文提交日期:  
论文答辩时间:  
学位授予日期:

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_  
评阅人: \_\_\_\_\_

2015 年 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于  
年    月    日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年    月    日



---

## 摘 要

本研究以混沌理论为基础，以金融市场的混沌特征为依据，以人工神经网络和智能优化算法为技术手段，建立了混沌时间序列预测模型。更进一步地，借助于 MetaTrader 交易平台，以混沌时间序列预测模型为核心，编写了外汇程序化交易策略，从交易结果中检验预测模型的有效性。本研究做出的主要工作及结论如下：

首先，本研究以 CiteSpaceII 文献分析软件为工具，以文献计量研究方法对金融时间序列预测研究的发展历程做了梳理。着重探讨了其非线性动力学方法的研究现状、热点及趋势，并以可视化图表的形式将结果呈现出来。引入非线性研究范式对金融变量进行建模，通过非线性迭代、学习模型近似描述金融混沌动力系统，是金融市场理论发展的必然趋势。

继而，本研究构建了递归预测器神经网络（RPNN）结合模拟退火粒子群优化算法（SA-PSO）的混沌时间序列预测模型。RPNN 专为混沌时间序列预测而设计，具有时间延迟多重分支，模拟了非线性动态系统的时序特性。RPNN 的训练采用 SA-PSO 混合智能优化算法，摆脱了原 BPTT 算法对于激活函数高阶可导的限制，扩展了 RPNN 的多样性。

然后，本研究检验了 RPNN-SA-PSO 模型对上证综指的预测能力。通过实证研究，本文从定性和定量两个方面对模型的预测能力做出了分析。实验证明：RPNN 适合于具有混沌特征的金融时间序列的预测。SA-PSO 混合优化算法具有快速收敛及全局搜索能力，用此算法优化 RPNN 的训练克服了原 BPTT 算法的缺点，并在预测结果上得以体现。

最后，本研究借助于 MT4 平台，以 RPNN-SA-PSO 模型为核心编写了外汇程序化交易策略，并检测了其对历史数据的有效性和对模拟实盘的有效性。实验做出的主要工作有二：一是以动态链接库的方式，将预测模型由 Visual Studio 导出并由 MetaTrader 调用，实现了和两个不同平台之间的连通；二是以预测模块为主，设计了配套的交易规则，实现了稳定的盈利。

**关键词：**神经网络；智能优化；程序化交易



---

---

## Abstract

Based on the chaos theory and the chaotic feature in financial markets, this research constructed a chaotic time series prediction model with artificial neural network and intelligent optimization algorithms. Further, aiming at testing the validity of the chaotic time series prediction model, this research took the model as core to program a forex trading strategy with the support of MetaTrader trading platform. The main contribution and conclusions of this research are as follows:

First of all, the CiteSpaceII literature analysis software was took as tools to card the development history of financial time series prediction with the qualitative research methods. Especially, we discussed the research status, hot spot and trend of the nonlinear dynamics method and presented the results in visual form. Introducing nonlinear research paradigm to model financial variables, using approximate nonlinear iteration and learning model to describe the financial chaos dynamic system, is the inevitable developing trend of financial markets theory.

Then, the chaotic time series prediction model was constructed using the recurrent predictor neural network (RPNN) combined with simulated annealing particle swarm optimization (SA-PSO) algorithm. Specially designed for chaotic time series prediction, the RPNN had multiple branches with time-delay, so that it was able to simulate the temporal characteristics of nonlinear dynamic systems. Applying SA-PSO hybrid intelligent optimization algorithm rather than original BPTT algorithm to train the RPNN, got rid of the limit of activation function for high order differentiable and expanded the diversity of RPNN.

Further, the prediction ability of the constructed RPNN-SA-PSO model was tested for Shanghai Composite Index. Through empirical research, this article analyzed the prediction ability from qualitative and quantitative aspects. Experimental results showed that: the RPNN was suitable for predicting financial time series with chaotic feature, and the SA-PSO hybrid optimization algorithm had fast convergence and global searching ability. Using this algorithm to train RPNN overcame the short- comings of original BPTT algorithm, and it was strongly supported by the prediction results.

---

---

Finally, the RPNN-SA-PSO model was took as core to program a forex trading strategy with the support of MetaTrader trading platform, and examined the validity of the model for both historical data and real data. The main contribution of this experiment were two aspects. On the one hand, deriving the RPNN-SA-PSO prediction model form Visual Studio to the MetaTrader by the way of dynamic link library (DLL), successfully connected the two different platforms. On the other hand, designing a set of trading rules which was matched with the RPNN-SA-PSO prediction model, realized stable and sustained profit.

**Keywords:** neural networks; intelligent optimization; programming trading



---

# 目 录

<b>1 引言</b>	<b>1</b>
<b>1.1 选题背景与研究意义</b>	<b>1</b>
1.1.1 选题背景	1
1.1.2 研究意义	3
<b>1.2 研究内容和研究框架</b>	<b>4</b>
1.2.1 研究内容	4
1.2.2 研究框架	5
<b>1.3 论文章节安排</b>	<b>6</b>
<b>2 文献可视化综述</b>	<b>8</b>
<b>2.1 混沌理论的起源和发展</b>	<b>8</b>
<b>2.2 金融市场的混沌特征</b>	<b>9</b>
2.2.1 有效市场假说	9
2.2.2 分形市场理论	9
2.2.3 金融市场混沌特征证据	10
<b>2.3 金融时间序列预测研究趋势</b>	<b>11</b>
2.3.1 数据来源及研究方法	12
2.3.2 发文量时间分布	12
2.3.3 发文量空间分布	13
2.3.4 研究热点及趋势分析	16
2.3.5 结论	18
<b>2.4 本章小结</b>	<b>19</b>
<b>3 混沌时间序列预测模型评述</b>	<b>20</b>
<b>3.1 神经网络与智能优化算法</b>	<b>20</b>
<b>3.2 递归预测器神经网络</b>	<b>21</b>
3.2.1 动态神经网络	21
3.2.2 递归预测器神经网络	23
<b>3.3 模拟退火-粒子群优化</b>	<b>24</b>
3.3.1 粒子群优化算法	24
3.3.2 模拟退火算法	25
3.3.3 模拟退火-粒子群优化结合算法	25
<b>3.4 SA-PSO 优化 RPNN 算法流程</b>	<b>27</b>
<b>3.5 本章小结</b>	<b>29</b>
<b>4 基于 RPNN-SA-PSO 模型的上证综指预测</b>	<b>30</b>

4.1 背景及意义 .....	30
4.2 原理及方法 .....	30
4.2.1 相空间信息与时延神经网络 .....	30
4.2.2 嵌入维数和时间延迟的选取 .....	32
4.2.3 RPNN 工作原理 .....	32
4.2.4 C++编程 .....	34
4.3 实验过程 .....	39
4.3.1 数据来源及步骤 .....	39
4.3.2 参数设定 .....	39
4.3.3 结果及分析 .....	40
4.3.4 结论 .....	43
4.4 本章小结 .....	44
5 基于 RPNN-SA-PSO 模型的程序化交易 .....	45
5.1 程序化交易与 MT4 简介 .....	45
5.2 外汇智能交易 .....	46
5.2.1 技术路线 .....	46
5.2.2 C++动态链接库 .....	47
5.2.3 交易规则 .....	49
5.3 EA 编写与测试 .....	51
5.3.1 数据选取 .....	51
5.3.2 过程及步骤 .....	51
5.3.3 结果及分析 .....	53
5.3.4 结论 .....	56
5.4 本章小结 .....	56
6 总结及展望 .....	57
6.1 总结 .....	57
6.2 展望 .....	58
参考文献 .....	60
附录 A .....	63
附录 B .....	68
致谢 .....	71
攻读硕士期间发表论文 .....	72

---

---

## Content

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1	Research Background and Movtivation.....	1
1.1.1	Research Background .....	1
1.1.2	Research Movtivation .....	3
1.2	Research Content and Framework.....	4
1.2.1	Research Content .....	4
1.2.2	Research Framework .....	5
1.3	Chapter Arrangement.....	6
<b>2</b>	<b>Visualized Literature Review .....</b>	<b>8</b>
2.1	Development of Chaos Theory.....	8
2.2	Chaotic Feature in Financial Market.....	9
2.2.1	Efficient Market Hypothesis .....	9
2.2.2	Frctal Market Hypothesis .....	9
2.2.3	Evidence of Chaotic Financial Market .....	10
2.3	Research Trend of Financial Time-series Prediciton .....	11
2.3.1	Data and Research Method .....	12
2.3.2	Time Distribution .....	12
2.3.3	Geographic Distribution .....	13
2.3.4	Hot Spot and Research Trend .....	16
2.3.5	Conclusion .....	18
2.4	Summary of This Chapter.....	19
<b>3</b>	<b>Chaotic time-series predicion model.....</b>	<b>20</b>
3.1	Neural Network and Intelligent Optimization.....	20
3.2	Recurrent Predictor Neural Network.....	21
3.2.1	Dynamic neural network.....	21
3.2.2	RPNN.....	23
3.3	Simulated Annealing and Particle Swarm Optimization .....	24
3.3.1	PSO .....	24
3.3.2	SA .....	25
3.3.3	SA-PSO.....	25
3.4	Algorithm Process of SA-PSO.....	27
3.5	Summary of This Chapter.....	29
<b>4</b>	<b>S. C. I. prediction with RPNN-SA-PSO model.....</b>	<b>30</b>

---

---

<b>4.1 Background and Significance.....</b>	<b>30</b>
<b>4.2 Theory and Method.....</b>	<b>30</b>
4.2.1 Phase Space and Time-delay Neural Network.....	30
4.2.2 Embedding Dimension and Time-delay .....	32
4.2.3 How RPNN works .....	32
4.2.4 C++ Programming .....	34
<b>4.3 Experiment Process .....</b>	<b>39</b>
4.3.1 Data and Procedure .....	39
4.3.2 Parameter Setting.....	39
4.3.3 Results and Analysis .....	40
4.3.4 Conclusion.....	43
<b>4.4 Summary of This Chapter.....</b>	<b>44</b>
<b>5 Programming trading with RPNN-SA-PSO model.....</b>	<b>45</b>
<b>5.1 Programming trading and Metatrader4.....</b>	<b>45</b>
<b>5.2 Forex Programming trading.....</b>	<b>46</b>
5.2.1 Technical route.....	46
5.2.2 C++ Dynamic link library.....	47
5.2.3 Trading Strategy.....	49
<b>5.3 EA Programing and Testing.....</b>	<b>51</b>
5.3.1 Data.....	51
5.3.2 Procedure .....	51
5.3.3 Results and Analysis .....	53
5.3.4 Conclusion.....	56
<b>5.4 Summary of This Chapter.....</b>	<b>56</b>
<b>6 Summary and Outlook .....</b>	<b>57</b>
6.1 Summary .....	57
6.2 Outlook .....	58
<b>Reference.....</b>	<b>60</b>
<b>Appendix A.....</b>	<b>63</b>
<b>Appendix B.....</b>	<b>68</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>71</b>
<b>Projects and Paper during Study .....</b>	<b>72</b>

## 第一章 引言

### 1.1 选题背景与研究意义

#### 1.1.1 选题背景

##### 1) 程序化交易的兴起

从十八世纪开始，金融投资者们就不断探索各种投资方式。格林厄姆的价值投资方法，造就了一代投资大师沃伦·巴菲特。然而，价值投资那类似中医“望、闻、问、切”的分析方法已越来越不能适应当下信息爆炸的时代——取而代之的是以定量模型为主的量化投资技术。近年来，程序化交易作为一种新兴的量化投资方法，越来越引起中国市场投资者的关注。所谓程序化交易是指将算法模型和交易规则编制成程序，并由计算机按照一定触发条件自动执行交易操作的过程。区别于传统定性投资很大程度上要依靠经验和感觉判断来进行操作，程序化交易强调的是量化的投资技术：它依靠模型判断，模型对整个市场进行检查和扫描，一旦市场达到模型所设定的交易条件，程序就会自动进行处理。

量化模型是程序化交易的核心。而程序化交易模型按照交易规则的不同，可分为指标分析型和预测型。指标分析型模型依赖于各种指标信号来触发交易，虽应用广泛但具有滞后性，永远走在市场的后面；预测型模型克服了滞后性缺陷，通过对市场的预判而掌握交易的主动性，然而准确性难以把握。但随着预测模型的持续改进和深入研究，其预测精度已越来越高，因此预测型模型是今后程序化交易的主要发展方向。

对于市场的预测真的可行吗？虽然有效市场理论指出任何通过对于资产价格的预测而企图获取超额收益的行为都是无用的，但越来越多的研究表明当前金融市场并非有效的：从资产价格的历史信息中挖掘出有望在未来重复的历史规律是可行的，这种“重复”虽非必然，但也是大概率事件。随着各种经典理论和计算机技术的发展，一些非线性系统科学如人工神经网络、混沌与分形理论等，逐渐被应用于金融市场的预测之中，掀起了一股利用非线性系统科学预测模型来进行程序化交易研究的热潮。

##### 2) 金融系统的混沌特性

金融系统的运行机制十分复杂，这种复杂性不是用一个简单的数学模型就能够

刻画的。由于思维惯性，金融研究者们虽承认金融运行的复杂性，但在理论基础和研究方法上总是在刻意回避这种复杂性——为简化模型，他们的研究总是建立在一些苛刻的、甚至不切实际的强假设条件之上。然而，实际金融市场中往往出现异常的剧烈波动、非理性投资、波动率异象等现象，即发生了因确定性状态失衡而导致的系统从量变到质变的不确定性。如果从混沌的角度去思考，这些问题就会有一个合理的解释<sup>[1]</sup>。

本质决定现象，现象反映本质。金融市场是个受多种因素影响的复杂非线性动力系统，而金融时间序列非平稳性、弱混沌性、以及信噪比低的特点，则是金融市场复杂性的综合外在表现，其中必然包含了金融系统的某些客观规律。

混沌现象在金融系统中无处不在，外汇市场也不例外：外汇价格吸引子的发现证实了外汇市场是一个混沌系统<sup>[2]</sup>。汇率的波动受某种确定性规则支配，同时又表现为表面上的类随机性。前者意思是，汇率波动实际上有迹可循，是可以预测的；而后者则显示了汇率极度敏感地依赖于初始条件，其长期演变不可预测。汇率混沌吸引子的构造特点告诉我们，它是具有较低自由度的低维动力系统，因而用较少的变量就能够近似描述其动力学特性。

### 3) 混沌的概念

混沌是自然界的法则。“南美洲的蝴蝶挥动一下翅膀，就可能会在佛罗里达引发一场风暴。”——1963年，气象科学家 E. N. Lorenz 在气象动力学的研究论文中提出了著名的“蝴蝶效应”<sup>[3]</sup>。他发现，在用计算机求解三阶常微分方程时，即便初始条件差之毫厘也会引起最终解的谬以千里，以此推断出天气长期预报的不可行性。这被认为是研究混沌问题的开篇之作。直到 1975 年，华人数学家李天岩和 J. A. Yorke 首次将“Chaos（混沌）”<sup>[4]</sup>作为学术名词提出。此后混沌动力学研究与其他学科相互融合、渗透，成为了认识自然的新手段，开启了复杂性科学的研究之路。

所谓混沌是指确定性系统中发生的貌似随机的过程，或者说由简单的规则生成了不可预估的结果。其表现为外在的无秩序性和内在的有秩序性的统一。具有以下几点特性<sup>[5]</sup>：1) 初始条件敏感性，即系统的演变极度依赖于其初始状态；2) 标度不变性，即是一种无周期的有序；3) 内在随机性，这种随机源自系统内部而非外部，可以用完全确定性的方程（无须加随机扰动项）来描述系统；4) 具有分形性质，各种奇异吸引子都具有分形特征（即分数维度）。

#### 4) 混沌时间序列及其预测

混沌时间序列是混沌系统离散状态的外在表现,蕴含着大量混沌系统内在的动态信息,它是混沌理论与现实世界沟通的桥梁。1980年 Packard 等人提出了时间序列相空间理论<sup>[6]</sup>,开启了关于混沌时间序列的预测研究。而后, Takens 于 1981 年提出了相空间重构理论<sup>[7]</sup>:经过一定坐标延迟的相空间,可观测到混沌吸引子在重构的动力学系统相空间的运动轨迹。这为探究混沌时间序列的演化行为提供了途径。并且 Takens 已经证实,只要选取合适的坐标延迟  $m$ , 满足  $m \geq 2D+1$ , 那么就可以重构出混沌吸引子在相空间中的运动轨迹。其中坐标延迟又被称为嵌入维数,而  $D$  是混沌吸引子的关联维数。基于 Packard 坐标延迟的 Takens 相空间重构定理,将混沌理论引入到非线性时间序列预测与分析中,为后续混沌时间序列的预测研究奠定了坚实的基础。

混沌预测理论认为:一方面,混沌所具有的确定性特征使得很多看起来随机的表象实际上是可以预测的;而另一方面,混沌现象所固有的对初始条件的极度敏感性,又在根本上限制了其长期预测效果。因而,混沌动力系统在短期内的演化趋势是可预测的,但长期预测不太现实。

自 Takens 相空间重构定理提出以来,学术界一直不断在探索混沌时间序列的预测方法,比如局域预测法、自适应预测法等等。然而这些方法虽然在理论上合理,但实践中仍有许多不足。人工神经网络具备超强的自组织与自适应能力,以及对信息具有较好的容错率与联想记忆性,使其在预测混沌时间序列方面具有得天独厚的优势。自 1987 年, Lapedes 和 Farber<sup>[8,9]</sup>第一次选用具有时间延迟输入特性的神经网络预测混沌时间序列以来,诸如径向基函数(RBF)神经网络、Chebyshev 神经网络、时延(Time-delay)神经网络、递归(Recurrent)神经网络等多种模型被应用于一维混沌时间序列的预测研究中。

#### 1.1.2 研究意义

##### 1) 金融时间序列预测方法革新的需要

金融时间序列预测是金融定量分析的核心,在理论和实践上已经成为金融学研究不可或缺的部分。但是长久以来,金融时间序列预测方法受制于以有效市场假说统率的线性范式。在一系列理想的假设条件之上,线性范式把资产价格的波动归因于外部随机性因素,而相应的模型一般是加了随机扰动的线性方程。然而现实中的

资本市场很少能像线性关系所描述的那样秩序井然：资产收益率分布“尖峰厚尾”、波动率聚类、长期记忆等市场非线性特征，宣布了线性范式的失灵。

金融市场的形成和发展是一个非线性动力学过程，具有分形与混沌的特性。二十世纪九十年代，分形市场理论对资本市场的有效性提出了质疑。有效市场理论认为金融市场的无序性是无法描述的随机现象；而分形市场理论则指出这种外在的无秩序性其实有着内在的规律性，是可以描述的确定性随机。分形市场理论引领了一场利用分形和混沌来进行金融时间序列建模预测的革命，诸如人工神经网络模型和非线性动力学混沌模型等相继被提出<sup>[10-13]</sup>。以分形市场理论为基石的非线性动力学时间序列预测方法引领金融时间序列分析与预测进入一个崭新的时代<sup>[14-20]</sup>。

## 2) 程序化交易的需要

程序化交易，也称为算法交易、智能交易，是指先人为设计好交易策略，然后将策略用代码的语言写入程序，并利用算法和程序确定交易订单、价格、数量等信息的交易方式。

程序化交易并非完全依赖基本面分析和技术分析，而是根据程序自动实现交易和定时功能。它采用定量分析方法建立算法交易模型，由计算机程序依照事先设定好的交易策略进行订单管理和资金管理。程序化交易的快速发展对资本市场各个领域都产生了影响，比如资产定价、风险管理、组合投资等，而相关的一些经典理论如市场结构理论、流动性风险理论、利率期限结构理论等可能因此受到强有力地冲击。因此，程序化交易在全球各大金融市场得以广泛的应用是指日可待的。

基于以上两方面的需求，本研究以混沌理论为基础，以金融市场的混沌特性为根据，以人工神经网络和智能优化算法为技术手段，建立金融混沌时间序列预测模型；从金融时间序列历史数据中有效地剔除干扰噪声、合理地揭示序列规律、准确地预测未来走势。更进一步地，借助于 MetaTrader 交易平台，本研究以此预测模型为核心，编写了用于外汇程序化交易的策略（EA），从交易结果中检验预测模型的有效性。

## 1.2 研究内容和研究框架

### 1.2.1 研究内容

#### 1) 混沌时间序列预测模型

本研究采用 RPNN (Recurrent Predictor Neural Network, 递归预测器神经网络)



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库